干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

1960—2017年黄土高原地表温度时空变化特征

安 彬[1,2]， 肖薇薇[1]， 张淑兰[2]， 朱 妮[1]， 张建东[2]

(1. 安康学院旅游与资源环境学院/安康市汉江水资源保护与利用工程技术研究中心，陕西 安康 725000;
2. 安康学院陕西省院士专家工作站，陕西 安康 725000)

摘 要：以黄土高原59个气象站1960—2017年0 cm地表温度实测资料为基础，采用线性回归、Mann-Kendall检验和滑动t检验等方法，分析了年际、四季地温的时空变化规律。结果表明：(1) 黄土高原年际及四季地温均呈显著上升趋势(P<0.01)，气候倾向率冬季[0.531 ℃·(10a)$^{-1}$]>春季[0.497 ℃·(10a)$^{-1}$]>年际[0.397 ℃·(10a)$^{-1}$]>秋季[0.311 ℃·(10a)$^{-1}$]>夏季[0.276 ℃·(10a)$^{-1}$]。(2) 年际及四季地温突变集中发生在1990s中期—2000s中期，突变后较突变前升温幅度：春季>冬季>年际>夏季>秋季。(3) 黄土高原年际及四季地温均呈东南高、西北低的空间分布，所有气象站点年际、春季、冬季地温和67.80%站点的夏季、91.53%站点的秋季地温呈显著上升趋势(P<0.05)。

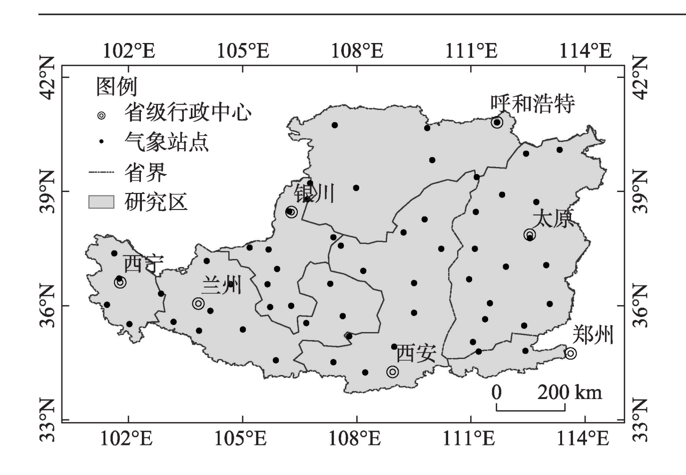
关 键 词： 0 cm地表温度；气候倾向率；时空变化；黄土高原
文章编号：

19世纪中期以来，全球陆地表面平均温度以0.19 ℃·(10a)$^{-1}$速率升高，且北半球增温幅度高于南半球；1951—2017年中国地表平均气温增温速率为0.24 ℃·(10a)$^{-1}$，是全球气候变化的敏感区[1]。地表温度是气候系统变化的重要参数之一，其变化特征反映了土壤热状况对气候变化的响应程度[2-5]，受到国内外学者的密切关注。王雪姣等[2]对新疆1961—2015年0 cm地表温度开展研究，得出新疆年际、四季地表温度均呈明显的增温趋势，云南[4]和山东菏泽[6]亦发现类似规律。王佳琳等[7]研究表明，我国北方地区0 cm地温较南方升温更加明显，大部分地区0 cm地表温度升温高于气温升幅。吕红玉等[8]和贾效禄等[9]分别对三江平原和乌鲁木齐深层地温进行研究，均指出深层地温随土层深度而增加。廖玉芳等[3]将湖南0~320 cm地温与气温变化进行比较，发现随着土壤深度增加，二者相关性减弱。Luintel等[10]使用MODIS数据分析了尼泊尔境内2000—2017年昼夜地表温度变化趋势，指出尼泊尔夜间地温增加幅度高于白天。此外，学者们还探讨了地表温度与大气环流[4,11]、气象要素[2,6,12]、下垫面性质[13]等因素的关联性。以上研究主要集中在地温时空变化特征及影响因素等方面，针对黄土高原地表温度方面的研究鲜有报道。基于此，文中选取黄土高原59个气象站地表温度数据，运用气候统计分析和ArcGIS空间插值法，对其近58 a的0 cm地表温度时空变化特征进行了分析，以期为黄土高原地区合理利用气候资源、调整农业生产结构及其布局提供理论参考。

1 资料与方法

本文选取黄土高原地区59个气象站逐日0 cm地表温度（以下均简称为“地温”）实测数据，由中国气象数据网(http://data.cma.cn/)提供；依据数据连续性及最长时间段原则，确定研究时段为1960年1月1日—2017年12月31日。所选数据均进行了严格的质量核查，站点具体位置见图1。季节划分为春季（3—5月）、夏季（6—8月）、秋季（9—11月）、冬季（12—翌年2月）。研究区年际及季节地温为59站点对应时期的算数平均值。采用线性回归法[14]计算地温的变化趋势，记为气候倾向率，并对其显著性进行F检验；综合Mann-Kendall检验[14]和滑动t检

收稿日期： 2020-06-03； **修订日期：** 2021-01-08
基金项目： 国家自然科学基金重点项目(41230852)；陕西省教育厅项目(19JK0004，20JK0009)；安康学院高层次人才引进项目(182401245)
作者简介： 安彬(1988-)，男，讲师，主要从事区域环境变化与GIS应用研究. E-mail: leyang1007@126.com



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1719号的标准地图制作，底图无修改。下同。

图1　黄土高原59个气象站点分布图

Fig. 1　Distribution of 59 meteorological stations in the Loess Plateau

验法[15]判断地温是否发生突变；地温空间分布的可视化表达采用ArcGIS中样条函数插值分析[16]。

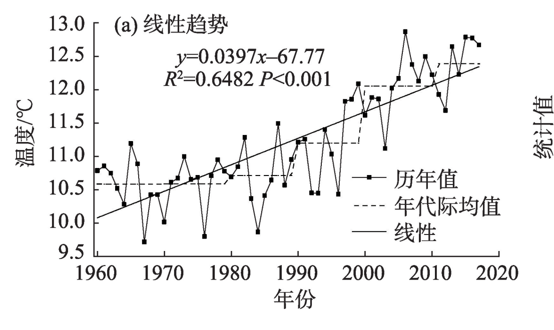
2　结果与分析

2.1　地温时间变化特征

2.1.1　年际地温变化趋势　整体而言，近58 a黄土高原年均地温呈波动上升趋势，其气候倾向率为0.397 ℃·(10a)$^{-1}$(P<0.001)(图2a)，高于该区1961—2014年平均气温上升速率[0.31 ℃·(10a)$^{-1}$][17]。1960—2017年，黄土高原多年平均地温为11.21 ℃，最高平均地温为12.87 ℃(2006年)，最低平均地温为9.72 ℃(1967年)。从年代际来看，地温由1960s的10.58 ℃小幅增加至1980s的10.71 ℃；但进入1990s以后，地温快速增加，由1990s的11.20 ℃增至2010—2017年的12.39 ℃，响应了1990s黄土高原气温开始变暖加速的事实[18]。由M-K检验(图2b)可知，曲线UF与UB相交于1998年，且交点位于显著性水平线之间，且其滑动t检验值为7.42，高于$t_{0.05}$=1.96，表明地温从1998年开始出现由低到高的突变。突变后年均地温为12.17 ℃，较突变前年均地温10.71 ℃高出1.46 ℃，增温幅度达13.63%。

2.1.2　季节地温变化趋势　黄土高原各季平均地温均呈上升趋势，均通过了0.001显著性水平检验，但不同季节增温幅度存在较大差异(图3)。具体看，冬季地温气候倾向率最大，为0.531 ℃·(10a)$^{-1}$；春季和秋季次之，分别为0.497 ℃·(10a)$^{-1}$、0.311 ℃·(10a)$^{-1}$；夏季地温气候倾向率最小，为0.276 ℃·(10a)$^{-1}$。由此可见，黄土高原冬春季地温对年均地温的升高有主要贡献。从四季的年代际变化情况看，春季地温波动范围为±2.0 ℃，1970s为各年代最低，1980s至1990s缓慢上升，2000s后升温幅度较大，并在2010—2017年达到最高。夏季地温年代际变化分为2个阶段：1960s至1980s逐渐下降并达到最低，1990s以后逐渐上升并在2010—2017年达到最高。秋季地温年代际变化规律与春季相似，在多年均值±1.5 ℃之间波动，但变化较春季更为平缓。冬季地温自1960s以来持续上升，由1960s的−5.57 ℃升至2010—2017年的−3.02 ℃，升温幅度为四季最高。

对黄土高原各季地温进行M-K突变检验(表1)，近58 a春、夏、秋、冬四季地温均出现上升突变，所有突变时间点均通过了滑动t检验；与突变前相比，突变后地温升温幅度更加明显，但突变后只有冬季地温气候倾向率通过了0.05的显著性检验。其中，冬、春季突变时间分别为1996、1997年，突变后较突变前地温均值上升1.66 ℃、1.94 ℃；夏、秋季在2005年和2003年发生突变，突变后较突变前地温均值分别上升1.30 ℃、1.17 ℃。由此得出，黄土高原地温突变后较突变前升温幅度：春季>冬季>夏季>秋季。依据各季地温的方差能判断其变化的稳定



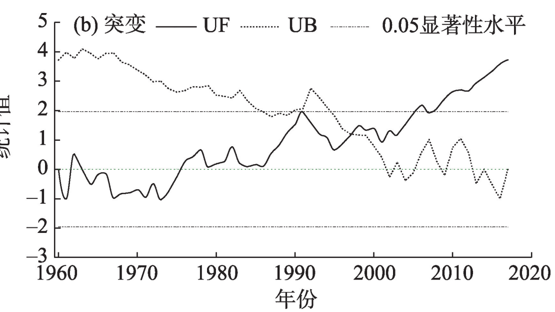


图2　1960—2017年黄土高原年际地温线性趋势及其突变

Fig. 2　Linear trend of annual surface temperature and its abrupt change in the Loess Plateau during 1960—2017

程度,可以看出,除春季外,夏、秋、冬季突变后的地温方差均小于突变前,说明夏、秋、冬季地温在突变后变化更为平稳。

2.2 地温空间变化特征

2.2.1 年际地温空间分布 整体而言,黄土高原年均地温呈东南高西北低的空间分布特征,表现出较明显的纬度地带性规律(图4a)。黄土高原南部的河谷平原区多年平均地温最高,介于14.0~18.5 ℃之间;青海西宁北部山区、甘肃华家岭、内蒙古高原等多年平均地温低于0 ℃。由图4b可知,黄土高原全区年际地温以0.04~1.30 ℃·(10a)$^{-1}$的速率上升,高原内黄河以西地区升温速率最高,陕西中北部、山西

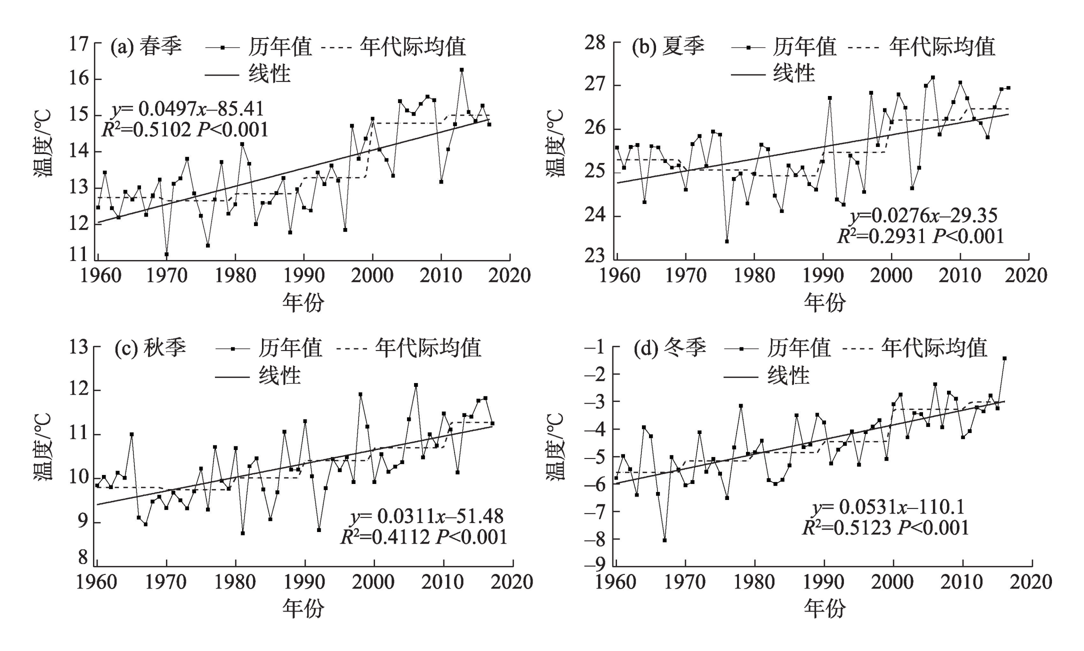


图3 1960—2017年黄土高原季节地温线性趋势

Fig. 3 Linear trends of seasonal surface temperature in the Loess Plateau during 1960—2017

表1 黄土高原季节地温M-K突变检验

Tab. 1 M-K mutation test of seasonal surface temperature in the Loess Plateau

季节	突变前			突变年份	突变后		
	气候倾向率/℃·(10a)$^{-1}$	均值/℃	方差		气候倾向率/℃·(10a)$^{-1}$	均值/℃	方差
春季	0.047	12.77	0.449	1997	0.443	14.71	0.606
夏季	0.096	25.26	0.553	2005	0.121	26.56	0.214
秋季	0.198*	10.01	0.461	2003	0.439	11.18	0.365
冬季	0.364*	−5.09	0.995	1996	0.621*	−3.43	0.646

注: *表示气候倾向率通过了α=0.05的显著性检验。

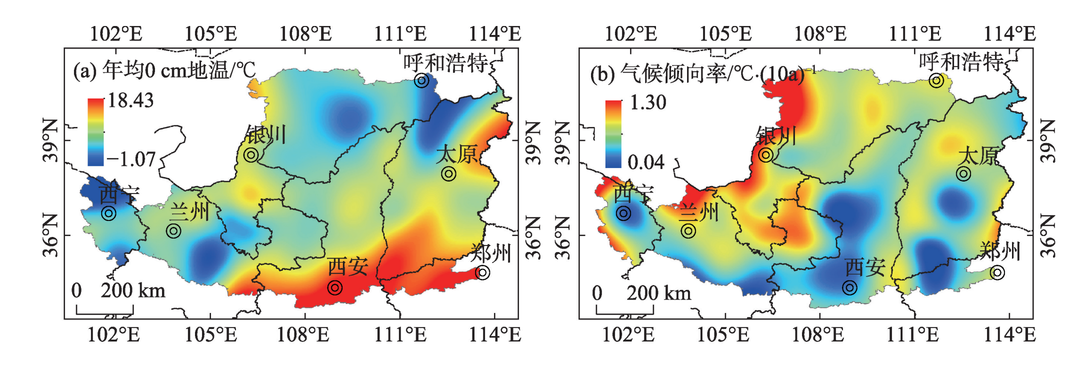


图4 黄土高原年均地温及其气候倾向率空间分布

Fig. 4 Distribution of annual surface temperature and its climatic tendency in the Loess Plateau

与河南交界处升温速率最低。

2.2.2 季节地温空间分布　黄土高原地区四季平均地温的空间分布特征与年均地温较为一致，亦呈南部高于北部、东部高于西部的特点；但各季地温存在明显的空间差异(图5)。具体来看，全区春季多年平均地温高于0 ℃，高值出现在西安-运城一带及山西五台地区，低值出现在青海门源、甘肃华家岭及山西右玉等地。夏季多年平均地温亦高于0 ℃，高值分布与春季较为相似，低值则集中出现在青海东部、甘肃南部。秋季多年平均地温变化介于-1.02~17.48 ℃之间，高值和低值分布区均与春季相似。大部分地区冬季地温低于0 ℃，呈明显"南高北低"的纬度地带性。

由图6可知，黄土高原所有气象站点的春季和

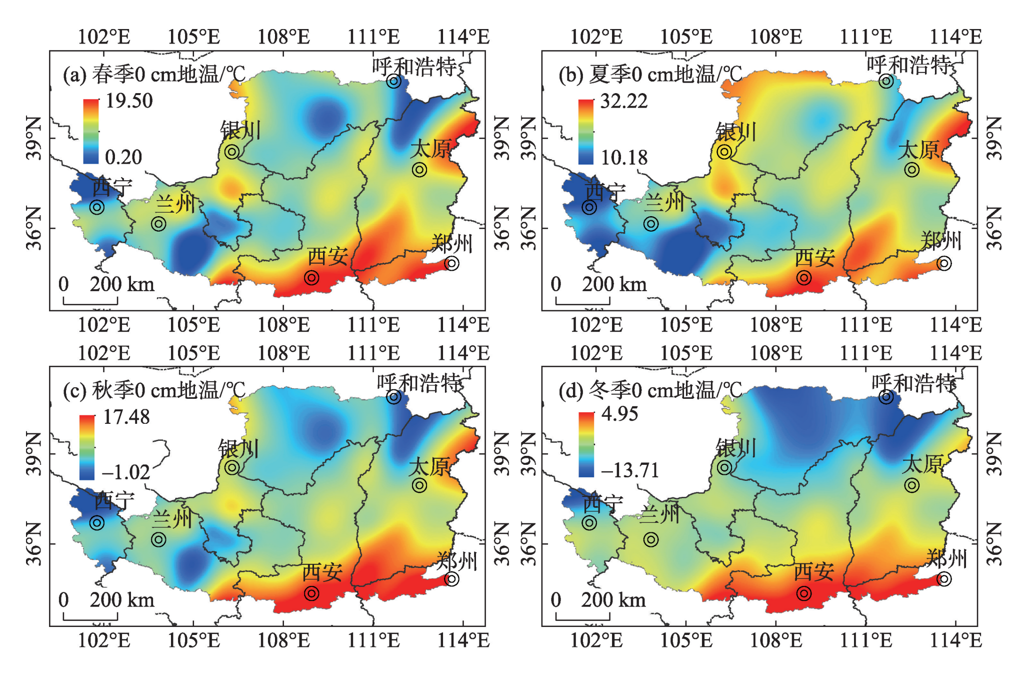


图5　黄土高原季节地温空间分布

Fig. 5　Distributions of seasonal surface temperature in the Loess Plateau

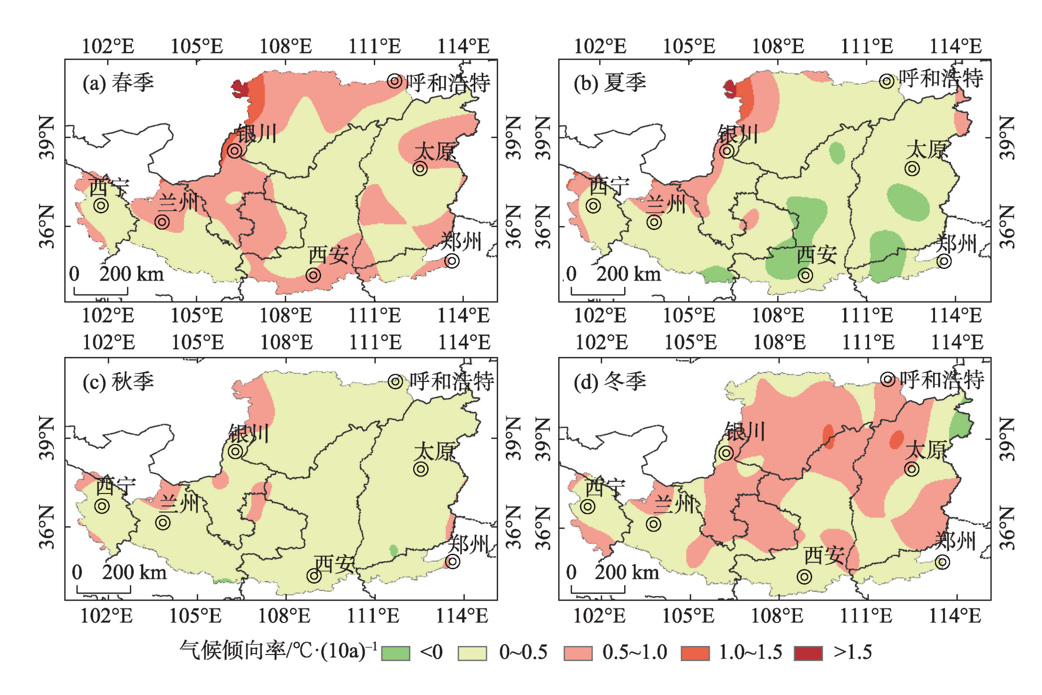


图6　黄土高原季节地温气候倾向率空间分布

Fig. 6　Climatic tendency distributions of seasonal surface temperature in the Loess Plateau

冬季地温上升趋势明显($P<0.05$),其中春季有35站点增温幅度介于0~0.5 ℃之间,占全部站点的59.32%,而冬季地温有34站点上升幅度在0.5~1.0 ℃之间。夏季和秋季地温多以0~0.5 ℃速率上升,站点数分别有42、56个,其中呈显著上升($P<0.05$)的站点占全部气象站的达67.80%、91.53%;值得注意的是,在陕甘交界及汾河谷地等地的夏季地温呈减少趋势。总体上看,春、夏季河套平原升温趋势最为明显,均在1.0 ℃以上。

3 讨 论

伴随全球气候变暖的发展趋势,地表温度也定将会受到影响[12]。黄土高原属我国半湿润与干旱半干旱气候的过渡带,生态环境较脆弱,同时也是气候变化的敏感区[18]。相关研究表明,1960s以来黄土高原气候暖干化趋势明显[19],年际气温和降水分别以0.31 ℃·(10a)$^{-1}$、−7.51 mm·(10a)$^{-1}$的线性趋势变化,气温升高趋势呈现出冬季>春季>年际>秋季>夏季的特点[17-18];对应气温的极值指数亦呈上升趋势[20]。表2显示1960—2017年黄土高原年际、四季的地温气候倾向率与气温排序一致,且均高于同期的气温增速,说明黄土高原地温对气温的强烈响应,气温通过地-气的热量交换过程直接影响地温变化[21],但年际和四季地温对气温响应程度略有差异。近58 a来,黄土高原地区年际、四季的地气温差均呈上升趋势,地气温差上升趋势呈现出春季>夏季>年际>冬季>秋季,与我国年际及四季的地气温差上升趋势背景相吻合[22]。地气温差的增大意味近地层空气稳定度降低,对流增强,致使地表水分蒸发量增加[6,23],印证了黄土高原春季潜在蒸发量呈增加趋势,且对全年潜在蒸发量的变化趋势影响最显著[24]。张耀宗等[25]研究指出黄土高原地区自1998年以来气温出现变暖趋缓现象(Hiatus),与整个研究时段相比(表2),发现黄土高原地区年际、四季地温在1998—2017年上升趋势有所减缓,地气温差趋势有所加速,表明黄土高原地区地温也存在Hiatus现象。同时,M-K分析显示黄土高原年际及四季地温突变集中发生在1990s中期—2000s中期,晚于气温的突变时间(1980s中期—1990s中期)[18],可能与地温升高起因于气温升高,地温具有明显的缓冲和持续效应有关[26],但具体原因有待进一步研究。

空间上,多数站点年际及四季气温[17]、地温均呈上升趋势。通过对黄土高原地温与海拔、经纬度等地理因子进行相关分析(表3),可知,除夏季与纬度呈较弱正相关($\alpha>0.05$)外,年际、春、秋、冬季地温均与海拔、纬度呈显著负相关($\alpha<0.01$);年际、春、夏

表2 黄土高原地区不同时期地温、气温与地气温差的年际和季节趋势变化对比

Tab. 2 Comparison of the trends of annual and seasonal surface temperature, air temperature and their difference during different periods in the Loess Plateau

指标	1960—2017年					1998—2017年				
	年际	春季	夏季	秋季	冬季	年际	春季	夏季	秋季	冬季
地温趋势/℃·(10a)$^{-1}$	0.397	0.497	0.276	0.311	0.531	0.355	0.454	0.316	0.182	0.457
气温趋势/℃·(10a)$^{-1}$	0.326	0.354	0.201	0.281	0.479	−0.011	0.084	0.069	−0.095	−0.174
地气温差趋势/℃·(10a)$^{-1}$	0.084	0.151	0.091	0.038	0.056	0.366	0.370	0.246	0.277	0.631

注:地气温差是地温与气温之差,计算年际及季节地气温差后,再采用线性回归法计算地气温差趋势。

表3 黄土高原年际、季节地温与地理因子的相关系数和线性趋势

Tab. 3 Correlation coefficient and linear trend between annual and seasonal surface temperature and geographical factors in the Loess Plateau

地理因子	相关系数					线性趋势				
	年际	春季	夏季	秋季	冬季	年际	春季	夏季	秋季	冬季
海拔	−0.793**	−0.794**	−0.907**	−0.797**	−0.442**	−0.343a	−0.331a	−0.457a	−0.336a	−0.251a
经度	0.333**	0.338**	0.522**	0.366**	0.037	0.236a	0.230a	0.430a	0.252a	0.034
纬度	−0.476**	−0.365**	0.048	−0.500**	−0.856**	−0.658a	−0.484a	0.077	−0.673a	−1.553a

注:*,**分别表示相关系数通过了$\alpha=0.05$、$\alpha=0.01$的显著性检验;a表示线性趋势通过了$F_{0.01}$的显著性检验;线性趋势的含义是海拔每上升100 m、纬度向北和经度向东每增加1°时地温的变化幅度。

及秋季则与经度呈明显的正相关(α<0.01)，冬季地温与经度呈弱正相关(α>0.05)。海拔每上升100 m，年际及四季地温以0.251 ℃(冬季)~0.457 ℃(夏季)幅度下降；纬度每向北增加1°，年际及春、秋、冬季地温以0.484 ℃(春季)~1.553 ℃(冬季)幅度下降；经度每向东增加1°，地温增加0.034 ℃(冬季)~0.430 ℃(夏季)。总体看，黄土高原地区年际和春、夏、秋季地温受海拔高程的影响最大，冬季受纬度影响最大的特点。此外，黄土高原地温的空间分布可能与西太副高脊线位置[27]、植被覆盖度的改善[28-29]有密切关系。

4　结 论

(1) 时间上，1960—2017年黄土高原地区年际及四季地温均呈显著上升趋势，气候倾向率分别为0.397 ℃·$(10a)^{-1}$、0.497 ℃·$(10a)^{-1}$、0.276 ℃·$(10a)^{-1}$、0.311 ℃·$(10a)^{-1}$和0.531 ℃·$(10a)^{-1}$，增温幅度均高于同期的气温，冬、春季地温对年均地温的升高有主要贡献，地温对气温的强烈响应。年际和冬季地温在1960s最低，春、秋季地温在1970s最低，夏季地温在1980s最低，年际和四季地温均在2011—2017年最高；年际、四季地温在1998—2017年上升趋势有所减缓，地气温差趋势有所加速，黄土高原地区地温也存在Hiatus现象。

(2) M-K突变分析表明，黄土高原年际及四季地温集中在1990s中期—2000s中期发生上升突变，突变后较突变前升温幅度春季(1.94 ℃)>冬季(1.66 ℃)>年际(1.46 ℃)>夏季(1.30 ℃)>秋季(1.17 ℃)，与地温升高起因于气温升高，地温具有明显的缓冲和持续效应有关。

(3) 空间上，黄土高原年际及四季地温均呈东南高、西北低的空间分布，表现出较明显的纬度地带性规律，年际和春、夏、秋季地温主要受海拔高程影响，冬季主要受纬度影响。所有站点的年际和春、冬季地温均呈显著上升趋势($P<0.05$)，而夏、秋季地温分别有67.80%和91.53%站点呈显著上升($P<0.05$)。

参考文献(References)

[1] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2018)[R]. 北京: 中国气象局, 2018. [Climate Change Center of China Meteorological Administration. China blue book on climate change (2018)[R]. Beijing: China Meteorological Administration, 2018.]

[2] 王雪姣, 王森, 吉春容, 等. 1961—2015年新疆0 cm地温的时空分布特征及突变分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(4): 165-169. [Wang Xuejiao, Wang Sen, Ji Chunrong, et al. Spatial-temporal characteristics and mutation analysis of ground temperature in Xingjiang from 1961 to 2015[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(4): 165-169.]

[3] 廖玉芳, 张剑明, 郭凌曜. 1981—2013年湖南省地面温度变化特征[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(6): 122-129. [Liao Yufang, Zhang Jianming, Guo Lingyao. Variation characteristics of ground temperature in Hu'nan Province from 1981 to 2013[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(6): 122-129.]

[4] 程清平, 王平, 徐强. 1961—2013年云南地面温度时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2017, 24(6): 111-121, 397. [Cheng Qingping, Wang Ping, Xu Qiang. Temporal and spatial variation characteristics of surface temperature in Yunnan during 1960—2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(6): 111-121, 397.]

[5] Dash P, Gottsche F M, Olesen F S, et al. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: Theory and practice-current trends[J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(13): 2563-2594.

[6] 窦坤, 黄玉芳, 丁媛媛, 等. 1961—2013年菏泽0 cm地温变化特征及成因分析[J]. 中国农业资源与区划, 2016, 37(6): 63-69. [Dou Kun, Huang Yufang, Ding Yuanyuan, et al. Responses of ground surface temperature on climatic change Heze City, Shandong Province from 1961 to 2013[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2016, 37(6): 63-69.]

[7] 王佳琳, 潘志华, 韩国琳, 等. 1961—2010年中国0 cm地温变化特征及其与气温变化的关系[J]. 资源科学, 2016, 38(9): 1733-1741. [Wang Jialin, Pan Zhihua, Han Guolin, et al. Variation in ground temperature at a depth of 0 cm and the relationship with air temperature in China from 1961 to 2010[J]. Resources Science, 2016, 38(9): 1733-1741.]

[8] 吕红玉, 张林媛, 张宏茹, 等. 1981—2010年三江平原40~320 cm深地温变化特征[J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1346-1352. [Lü Hongyu, Zhang Linyuan, Zhang Hongru, et al. Variations of ground temperature at the depths of 40-320 cm in Sanjiang Plain, northeast China during 1981—2010[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, 34(6): 1346-1352.]

[9] 贾效禄, 杨青, 赵勇, 等. 近50 a乌鲁木齐市的深层地温特征[J]. 干旱气象, 2011, 29(2): 201-204. [Jia Xiaolu, Yang Qing, Zhao Yong, et al. Characteristics of soil temperature at deep layers in Urumqi in latest 50 years[J]. Arid Meteorology, 2011, 29(2): 201-204.]

[10] Luintel N, Ma W Q, Ma Y M, et al. Spatial and temporal variation of day time and night time MODIS land surface temperature across Nepal[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2019, 12(5): 305-312.

[11] 吴晓娜, 孙照渤. 欧亚大陆夏季地表温度的气候特征及与大气环流的联系[J]. 大气科学学报, 2015, 38(2): 195-204. [Wu Xiaona,

Sun Zhaobo. Climatic features of summer land surface temperature in Eurasian continent and its relationship with atmospheric circulation[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(2): 195-204.]

[12] 张威, 纪然. 辽宁省地表温度时空变化及影响因素分析[J]. 生态学报, 2019, 39(18): 1-13. [Zhang Wei, Ji Ran. Analysis of spatio-temporal variation and factors influencing surface temperature in Liaoning Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(18): 1-13.]

[13] 熊小菊, 廖春贵, 胡宝清. 2007—2016年广西地表温度时空分异规律及其影响因素[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(17): 44-52. [Xiong Xiaoju, Liao Chungui, Hu Baoqing. Spatial and temporal variation of surface temperature in Guangxi from 2007 to 2016 and its influencing factors[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(17): 44-52.]

[14] 徐建华. 计量地理学[M]. 第二版. 北京: 高等教育出版社, 2014: 95-123. [Xu Jianhua. Quantitative geography[M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 2014: 95-123.]

[15] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 62-65. [Wei Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 62-65.]

[16] 汤国安, 杨昕. ArcGIS地理信息系统空间分析实验教程[M]. 第二版. 北京: 科学出版社, 2012: 289-292. [Tang Guoan, Yang Xin, et al. ArcGIS geographic information system spatial analysis experiment course[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012: 289-292.]

[17] 顾朝军, 穆兴民, 高鹏, 等. 1961—2014年黄土高原地区降水和气温时间变化特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(3): 136-143. [Gu Chaojun, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Characteristics of temporal variation in precipitation and temperature in the Loess Plateau from 1961 to 2014[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(3): 136-143.]

[18] 晏利斌. 1961—2014年黄土高原气温和降水变化趋势[J]. 地球环境学报, 2015, 6(5): 276-282. [Yan Libin. Characteristics of temperature and precipitation on the Loess Plateau from 1961 to 2014[J]. Journal of Earth Environment, 2015, 6(5): 276-282.]

[19] 刘晓清, 赵景波, 于学峰. 黄土高原气候暖干化趋势及适应对策[J]. 干旱区研究, 2006, 23(4): 627-631. [Liu Xiaoqing, Zhao Jingbo, Yu Xuefeng. Study on the climatic warming-drying trend in the Loess Plateau and the countermeasures[J]. Arid Zone Research, 2006, 23(4): 627-631.]

[20] 杨维涛, 孙建国, 康永泰, 等. 黄土高原地区极端气候指数时空变化[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1456-1466. [Yang Weitao, Sun Jianguo, Kang Yongtai, et al. Temporal and spatial changes of extreme weather indices in the Loess Plateau[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1456-1466.]

[21] 李述训, 南卓铜, 赵林. 冻融作用对系统与环境间能量交换的影响[J]. 冰川冻土, 2002, 24(2): 109-115. [Li Shuxun, Nan Zhuotong, Zhao Lin. Impact of freezing and thawing on energy exchange between the system and environment[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 109-115.]

[22] 廖要明, 陈德亮, 刘秋锋. 中国地气温差时空分布及变化趋势[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 374-384. [Liao Yaoming, Chen Deliang, Liu Qiufeng. The spatiotemporal characteristics and long-term trends of surface-air temperatures difference in China[J]. Climate Change Research, 2019, 15(4): 374-384.]

[23] 贾金明, 朱腾冉, 王惠芳, 等. 濮阳市0 cm地温变化特征及成因分析[J]. 气象科技, 2009, 37(3): 330-335. [Jia Jinming, Zhu Tengran, Wang Huifang, et al. Characteristics and causal analysis of ground temperature variation in Puyang[J]. Meteorological Science and Technology, 2009, 37(3): 330-335.]

[24] 韩盟伟, 赵广举, 穆兴民, 等. 黄土高原1959—2015年潜在蒸发量的时空变化[J]. 干旱区地理, 2017, 40(5): 997-1004. [Han Mengwei, Zhao Guangju, Mu Xingmin, et al. Spatial and temporal variations of potential evapotranspiration on the Loess Plateau during 1959—2015[J]. Arid Land Geography, 2017, 40(5): 997-1004.]

[25] 张耀宗, 张勃, 刘艳艳, 等. 1960—2013年黄土高原地区气温变化对Hiatus现象的响应[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 213-219. [Zhang Yaozong, Zhang Bo, Liu Yanyan, et al. Response of variability of temperature in the Loess Plateau to the Hiatus in the process of global warming in the period from 1960 and 2013[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 213-219.]

[26] 周刊社, 罗骕翾, 杜军, 等. 西藏高原地温对气温变化的响应[J]. 中国农业气象, 2015, 36(2): 129-138. [Zhou Kanshe, Luo Suxuan, Du Jun, et al. Response of soil temperature to air temperature change in Tibet Plateau[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(2): 129-138.]

[27] 赵红岩, 杨瑜峰, 张久林, 等. 夏季西太副高位置与中国地温场的关系[J]. 高原气象, 2007, 26(5): 1119-1122. [Zhao Hongyan, Yang Yufeng, Zhang Jiulin, et al. The relationships between the position of west Pacific subtropical high and ground temperature field of China summer[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(5): 1119-1122.]

[28] 郭永强, 王乃江, 褚晓升, 等. 基于Google Earth Engine分析黄土高原植被覆盖变化及原因[J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4804-4811. [Guo Yongqiang, Wang Naijiang, Chu Xiaosheng, et al. Analyzing vegetation coverage changes and its reasons on the Loess Plateau based on Google Earth Engine[J]. China Environmental Science, 2019, 39(11): 4804-4811.]

[29] 张翀, 白子怡, 李学梅, 等. 2001—2018年黄土高原植被覆盖人为影响时空演变及归因分析[J]. 干旱地理, 2021, 44(1): 188-196. [Zhang Chong, Bai Ziyi, Li Xuemei, et al. Spatio-temporal evolution and attribution analysis of Human effects of vegetation cover on the Loess Plateau from 2001 to 2018[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 188-196.]

Spatial and temporal characteristics of surface temperature in the Loess Plateau during 1961—2017

AN Bin[1,2],　XIAO Weiwei[1],　ZHANG Shulan[2],　ZHU Ni[1],　ZHANG Jiandong[2]

(1. College of Tourism and Environment Resources/Engineering Technology Research Center for Water Resource Protection and Utilization of Hanjiang River, Ankang University, Ankang　725000, Shaanxi, China;　2. Academician (Expert) Workstation of Shaanxi Province, Ankang University, Ankang　725000, Shaanxi, China)

Abstract: Surface temperature is an important parameter of climate change in the Loess Plateau, China. The spatial and temporal variation characteristics of surface temperature were studied using linear regression, Maan-Kendall test and sliding *t*-test, etc., based on measured data of 0 cm surface temperature collected from 59 meteorological stations in the Loess Plateau from 1961 to 2017. The results showed that (1) the annual and four seasonal surface temperatures of the Loess Plateau were significant ($P<0.01$). The highest climate tendency was in winter, which was 0.531 ℃·$(10a)^{-1}$, followed by the tendencies in spring, annual and autumn, the data were 0.497 ℃·$(10a)^{-1}$, 0.397 ℃·$(10a)^{-1}$, 0.311 ℃·$(10a)^{-1}$, respectively. The lowest was in summer at 0.276 ℃·$(10a)^{-1}$. The increasing range in annual and seasonal ground temperature was higher than the air temperature change over the period. The increase of annual ground temperature was mainly affected by changes in ground temperature in winter and spring, and it has a strong temperature response. The lowest annual and winter ground temperature was in the 1960s, spring, and autumn in the 1970s, and summer in the 1980s. From 2011 to 2017, the highest annual and four-season ground temperature was observed. From 1998 to 2017, the annual and four-season ground temperature rising trend slowed, while the ground air temperature difference increased. (2) The abrupt changes in annual and seasonal surface temperatures were concentrated from the mid-1990s to the mid-2000s. After the mutation, the largest warming range was in spring, followed by winter, annual, summer, and autumn. It is related to the fact that the rise in the ground temperature is caused by the rise in air temperature, and the ground temperature has obvious buffering and persistent effects. (3) The annual and four-season surface temperatures of the Loess Plateau are higher in the south, lower in the north, higher in the east, and lower in the west. The altitude influence the annual, spring, summer, and autumn ground temperatures the most, while latitude influences the winter ground temperature the most. The annual, spring, and winter surface temperatures of all meteorological stations showed a significant upward trend ($P<0.05$), while 67.80% of stations in summer and 91.53% in autumn had the same characteristics.

Key words: 0 cm surface temperature;　climate tendency rate;　temporal and spatial change;　Loess Plateau